第四方物流协同路径定制问题研究 *

崔 妍 [1]，黄 敏 [2]，李 波 [1]

(1. 沈阳工程学院 信息学院，沈阳 110136 2. 东北大学 信息科学与工程学院 流程工业综合自动化教育部重点实验室，沈阳 110819)

摘 要：为了解决第三方物流（3PL）供应商面临的高运输成本问题，以第四方物流（4PL）供应商的角度，提出了多第三方物流（3PL）供应商协同为客户定制路径的问题。针对该问题在模型求解上要同时考虑路径与 3PL 供应商的特点，设计了基于 k-短路的混合粒子群算法(K-PSO)。实验分析中，通过 K-PSO 算法与遗传算法和枚举算法对不同节点数目以及不同 3PL 供应商个数下仿真算例的计算表明了算法的有效性。最后，通过对 3PL 转运成本的改变，展示了 4PL 协同运输的优势。

关键词：协同运输；粒子群算法；第四方物流；k-短路算法

中图分类号：F505 doi: 10.19734/j.issn.1001-3695.2018.07.0535

Research on 4PL collaborative routing customization problem

Cui Yan[1], Huang Min[2], Li Bo[1]

(1. *College of Information*, *Shenyang Institute of Engineering*, *Shenyang* 110136, *China*; 2. *Key Laboratory of Integrated Automation of Process Industry of Ministry of Education*，*College of Information Science & Engineering*, *Northeastern University*, *Shenyang* 110819, *China*)

Abstract: In order to solve the high transportation cost problem faced by the third party logistics (3PL) suppliers, from the fourth party logistics (4PL) supplier's point of view, a multi 3PL Collaborative Routing Customization Problem is proposed. As the problem needs to consider the route and the 3PLs simultaneously, a hybrid Particle Swarm Optimization based K-shortest path algorithm (K-PSO) is designed. In the experimental analysis, the results show the effectiveness of the K-PSO by comparing with the GA and enumeration algorithm with different nodes' and 3PL suppliers' number. Finally, through the changes of the 3PL suppliers' transit cost, it shows the advantages of the 4PL coordinated transportation.

Key words: collaborative transportation; particle swarm optimization; fourth party logistics; k-shortest path algorithm

0 引言

第四方物流(forth party logistics, 4PL)协同路径定制问题（4PL collaborative routing customization problem，4PLCRCP）是指单第三方物流(Third Party Logistics, 3PL)供应商很难胜任或者需要付出较高代价才能完成客户交给的运输工作时，由 4PL 供应商利用其拥有的信息资源协同多个 3PL 供应商共同为客户定制运输方案的问题。

有关协同物流的研究，其核心任务是对网络资源进行整体规划、调配获取和集成优化[1]。对于 4PLCRCP，4PL 供应商不仅要协同多个物流分支，还肩负着为物流分支选择 3PL 供应商的工作。在之前的研究中，任意两节点间的 3PL 供应商被认为是独立的[2]。而实际运输中很多 3PL 业务范围大、只是在个别路段存在劣势。因此，4PL 应利用其拥有的信息资源为客户选择 3PL 供应商，从而使配送方案更具优势。

在 4PLCRCP 中，由于协同机制的加入，使 4PL 要顾及各转运节点的具体情况。许多学者对 4PL 问题的求解方法进行了研究[2~5]。但是在 4PLCRCP 中，问题除了具有在多重图下寻找约束最短路的特征，还要计算转运节点的转换费用和时间。如果使用简单图求出所有路径，虽然理论可行，但解空间会非常庞大。因此，本文首先利用 K-短路算法求解简单图的前 K 短路径，然后再利用粒子群算法选择路径上的供应商。提高了算法效率的同时增强了算法的有效性。

鉴于以上分析，本文基于 4PL 协同运输模式，建立了同时考虑 3PL 供应商停靠与转换成本的 4PLCRCP 数学模型。设计了基于 K-短路算法的混合粒子群算法（K-PSO）。实验分析中，针对不同节点数目和不同 3PL 供应商数目下的实例计算，以及与遗传算法和枚举算法计算结果的对比分析表明了 K-PSO 算法的有效性。最后，通过对不同转换成本下的实例计算表明：与客户只使用单一 3PL 供应商的运输模式相比，选择 4PL 协同运输模式不仅可以增加任务按时完工的比率还能为客户节省一定的费用。

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

假设某 4PL 供应商拟承揽一项由供应点 v_1 到目的点 v_n 的

收稿日期：2018-07-31；**修回日期：**2018-10-08 **基金项目：**国家杰出青年科学基金资助项目（71325002）；国家自然科学基金重点国际合作研究项目（71620107003）；国家自然科学基金创新研究群体项目（61621004）；流程工业综合自动化国家重点实验室基础科研业务费资助项目（2013ZCX11）；国家自然科学基金面上项目（61773269）；国家自然科学基金青年科学基金资助项目（71602124）；辽宁省自然科学基金资助项目（2015020020）；辽宁省社会科学规划基金资助项目（L15BGL035）；沈阳工程学院博士启动项目（LGBS-1401）

作者简介：崔妍（1982-）女，辽宁沈阳人，讲师，博士，主要研究方向为第四方物流优化与智能计算方法（slccyy@163.com）；黄敏（1968-）女，福建长乐人，教授，博士，主要研究方向为第四方物流优化与管理、生产存储及虚拟企业风险管理等；李波（1980-）男，山东青岛人，讲师，博士，主要研究方向为仿真技术.

运输任务，其中 $v_2 \sim v_{n-1}$ 为中转节点。网络由 r 个 3PL 供应商组成。4PL 可以根据 3PL 供应商的运输范围指派任务。每个 3PL 供应商在运输过程和在经过中转节点时均需要一定的时间和费用。如果 4PL 在相邻路径使用不同的 3PL 供应商，还会产生转换 3PL 的时间和费用（起始和终止节点视为转换节点）。

将上述问题的 3PL 供应商看做边并以编号 $1,\ldots,r$ 标志，于是得到 4PLCRCP 运输网络多重图 $G(V,E)$（其中，V 为节点集，E 为边集）。

基于上述假设，为建立 4PLCRCP 模型需要定义的参数及变量如下：

1）参数说明

r 表示运输网络中 3PL 供应商的数量；

T 表示交货时间；

T_{ijk} 表示:3PL 供应商 k 将货物由点 i 运输到点 j 的时间；

T_i 表示在节点 i 的停靠时间；

T_i' 表示在节点 i 更换 3PL 供应商的时间；

b_i :点 i 对货物的需求量, $b_i = \begin{cases} -1, & \text{i是始发节点} \\ 1, & \text{i是需求节点} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

C_{ijk} 表示 3PL 供应商 k 将货物由点 i 运至点 j 的费用；

C_i 表示在中转节点 i 的停靠费用；

C_i' 表示在节点 i 更换 3PL 供应商的费用。

2）变量定义

x_{ijk} 表示供应商 k 是否承担 i 到 j 的运输任务，即 $x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{供应商k负责i到j的运输任务} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

y_i 表示节点 i 是否承担运输任务，即 $y_i = \begin{cases} 1, & \text{点i承担运输任务} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

z_i 表示途径点 i 时，是否在点 i 更换 3PL 供应商。即

$z_i = \begin{cases} 1, & y_i == 1\text{且在点i更换3PL供应商} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

其中 $i,j \in \{1,\ldots,n\}, k \in \{1,\ldots,r\}$ 。

1.2 数学模型

本文目标是求得一条满足约束条件的费用最短路 R 。在路径 R 下，要同时考虑 3PL 供应商、转运节点以及转换 3PL 供应商的时间和费用。根据上述描述，建立的模型如下：

$$Z = \min\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{r} C_{ijk}x_{ijk} + \sum_{i=1}^{n} C_i y_i + \sum_{i=1}^{n} C'_i z_i\right) \tag{1}$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{r} T_{ijk}x_{ijk} + \sum_{i=1}^{n} T_i y_i + \sum_{i=1}^{n} T'_i z_i \leqslant T \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{r} x_{ijk} - \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{r} x_{jik} = b_j, \quad j \in \{1,2,\ldots,n\} \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{r} x_{ijk} = y_j, \quad j \in \{2,\ldots,n\} \tag{4}$$

$$\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{r} x_{ijk} = y_i, \quad i \in \{1,2,\ldots,n-1\} \tag{5}$$

$$z_i \le y_i, \quad i \in \{1,2,\ldots,n\} \tag{6}$$

$$y_1 = 1 \tag{7}$$

$$y_n = 1 \tag{8}$$

$$x_{ijk}, y_i, z_i = 0\text{或}1, \; i,j \in \{1,2,\ldots,n\}, k \in \{1,2,\ldots,r\} \tag{9}$$

在上面的模型中，式(1)为目标函数，表示在运输途中、在转运节点停靠和转换的费用总耗；式（2）表示到达目的地的时间不大于客户要求的时间；式(3)表示流量平衡；式(4)(5)表示选择的点是从起点到目的节点的通路；式(6)表示在 i 点转换则一定在 i 点中转；式(7)(8)分别表示路径的起始和终止节点；式(9)表示 x_{ijk} , y_i 和 z_i 为 0-1 变量。

2 基于 K-短路算法的混合 PSO 算法

2.1 主要步骤

在 K-PSO 中，求解过程包含初始解生成和解的更新两个阶段。在第一阶段，首先利用 K-短路算法求前 K 短路径，然后根据种群规模等比例扩展 K 短路数目，最后随机生成路径上的 3PL 并计算适值。在第二阶段，使用第一阶段的结果作为初始种群，然后利用 PSO 算法选择路径上的 3PL。每代种群中，对上代 K 短路的平均适值进行从小到大排序。然后利用旋转轮盘法[6]确定第 K 短路的数目。基于上面描述，算法的主要步骤如下：

a)利用 K 短路算法求前 K 短路径。根据 K 短路的结果确定 K 值。等比例扩展种群规模后，初始化路径上的 3PL 供应商并计算适值；

b)根据 K 短路的平均适值由轮盘法分配第 K 短路径在种群中的个体数目；

c)使用 PSO 算法求路径上的 3PL 供应商并计算适值。

d)对于不同的 K 短路，是否有更好解？是：更新该 K 短路的最好解；否则，不变；

e)是否达到最大迭代次数？是：转 Step6；否：转 Step2；

f)算法运行结束，比较各个 K 短路的最好解，输出最优者。

2.2 编码结构及初始解

根据问题特点，解的编码结构由路径上的节点集 $PATH = [p_1,\ldots,p_l]$ 和边集 $PL = [pl_1,\ldots,pl_{l-1}]$ 两个部分组成。其中 p_i（$p_i \in V$）表示路径上的第 i 个节点，pl_i ($pl_i \in E$) 表示使用的第 i 个 3PL 供应商（$i \in \{1,\ldots,n\}$）。

在初始解生成阶段，路径上的节点集 $PATH$ 由 K 短路算法得到。等比例扩展节点集的数目至种群规模，通过随机生成 3PL 供应商的方法构成解的边集，从而构成解的初始种群。

2.3 解的更新

在解的更新阶段，首先利用 PSO 算法的速度位置更新式[6]计算路径上 3PL 供应商的取值（0 或者 1），然后使用轮盘赌方法确定 3PL。具体方案如下：

假设第 g 个粒子位置：$PL_{gij} =$ $(x_{gij1}, x_{gij2}, \ldots, x_{gijr})$，速度：$V_{gij} =$ $(V_{gij1}, V_{gij2}, \ldots, V_{gijr})$，其中 $g = 1,\ldots,PS$，PS 表示种群规模，$i,j \in \{1,2,\ldots,n\}$ 。

$\forall k \in \{1,2,\ldots,r\}$，第 g 个粒子的速度 V_{gijk}^{d+1} 和位置 x_{gijk}^{d+1} 更新公式如下:

$$V_{gijk}^{d+1} = V_{gijk}^{d} + c_1\xi(P_{gijk}^{d} - x_{gijk}^{d}) + c_2\eta(P'^{d}_{gijk} - x_{gijk}^{d}) \tag{10}$$

$$x'^{d+1}_{gijk} = \begin{cases} 1, & random < S(V_{gijk}^{d+1}) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \tag{11}$$

$$x_{gijk}^{d+1} = \begin{cases} 1 & \text{轮盘赌选中} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{12}$$

其中: $S(V_{gijk}^{d+1}) = 1/(1+\exp(-V_{gijk}^{d+1}))$，$d = 1,2,\ldots,GEN$，$GEN$ 表示迭代次数，c_1 和 c_2 为学习因子，ξ 和 η 为[0,1]的随机数，P_{gijk}^{d} 为粒

子 g 所经历的最好点，$P_{gijk}^{'d}$ 为种群内所有粒子经历的当前最好点。

根据式（10）产生的 V_{gijk}^{d+1}（$k=1,2,\ldots,r$），由式（11）生成 i 到 j 的 3PL 的 0-1 取值。分别计算 3PL 取值为 1 时的路径适值，然后按照从小到大的顺序进行排序。设参数 $\mu\in(0,1)$，得到基于序的评价函数：

$$eval(k)=\mu(1-\mu)^{k-1} \tag{13}$$

选择过程以旋转轮盘的方法为基础。根据评价函数(13)，旋转轮盘并由式（12）确定最终被选中的 3PL 供应商。

2.4　适值函数

利用 K-短路算法求解 K 短路径时，未考虑路径的时间约束。本文将时间约束作为罚值加入到目标函数中，从而形成适值函数式（14）。

$$f=\begin{cases} Z+\alpha*(TT-T) & TT>T \\ Z & \text{其他} \end{cases} \tag{14}$$

其中 $\alpha(\alpha\geqslant1)$ 为惩罚系数。

3　数值实验

3.1　实验数据

针对 4PLCRCP 的特点，假设网络节点集 V 中的 n 个节点在 100*100 范围内随机生成。NO 表示可能与节点 i($\forall i\in V$) 有边相连的邻接点个数。D 为邻接矩阵（其中 D(i, j)=r 表示 i 到 j 有 r 条边，$i,j\in V$）。d(i, j).cost(ii)和 d(i, j).time(ii)分别表示节点 i 到节点 j 的第 ii (ii=1,…,r) 条边的费用和时间属性。实验数据分别由下面三个阶段生成：

a)生成与节点 i 相连的节点。

$\forall j\in V\cup j\neq n\cup j\neq i$，如果|j-i|≤NO，随机产生 1~NO 之间的随机整数 t1。如果 t>NO-1，则设定 i 到 j 之间没有边相连，即 D(i, j)=0；否则假设 i 到 j 有 r 条边相连，即 D(i, j)=r。

b)生成边（3PL 供应商）的费用和时间属性。

$\forall i,j\in V$，$\forall ii\in r$，如果 D(i, j) ≠0，随机产生 0~1 之间的随机数 t2。假设当 t2>0.2 时，i 到 j 第 ii 条边的运输费用为 1~15 之间的随机整数，即 d(i,j).cost(ii)=rand(1,15)；i 到 j 第 ii 条边的运输时间为两点之间的距离除以费用，即 d(i,j).time(ii)=|i-j|/d(i,j).cost(ii)。当 t2≤0.2 或对于其他节点，3PL 供应商的费用和时间为无穷大。

c)生成节点的费用和时间属性。

$\forall i\in V$,对节点 i 的中转和转运费用分别赋予 2~12 的随机整数;对节点 i 的中转和转运时间分别赋予 4~14 的随机整数。

3.2　结果分析

假设某 4PL 供应商拟承揽一项由节点 $v_1=1$ 到目的点 $v_n=8$，$r=5$ 的运输任务。数据由 3.1 节 NO=3 时产生。算法使用 Matlab7.0 并在 core2 2.83GHz Pc 上实现。经多次实验，较为合理的算法参数设置如下：

K=3,PS=5,GEN=20,c1=c2=2, ξ=0.5, η=0.8, μ=0.5, α=100

假设 T=26 天，得到的最优解为[1, 3, 6, 8]　[1, 5, 5]

这意味着，当决策者（4PL）需要在 26 天内将货物由节点 1 运至节点 8 时，使用编号为 1,5,5 的 3PL 供应商分别负责节点 1 到 3、节点 3 到 6 和节点 6 到 8 的运输工作。这一运输过程总耗时 25 天，费用 157.7。

图 1 展示了 n=8 时 K-PSO 算法的收敛情况。

为了增强算法求解 4PLCRCP 的说服力，随机产生 NO=5、n=30，NO=8、n=50 以及 NO=8、n=100 的算例。通过改进文献[2]设计的遗传算法（简称 GA）和枚举算法（简称 EM），分别对上述算例进行求解。假设每个算例运行 50 次，得到的结果如表 1 所示。

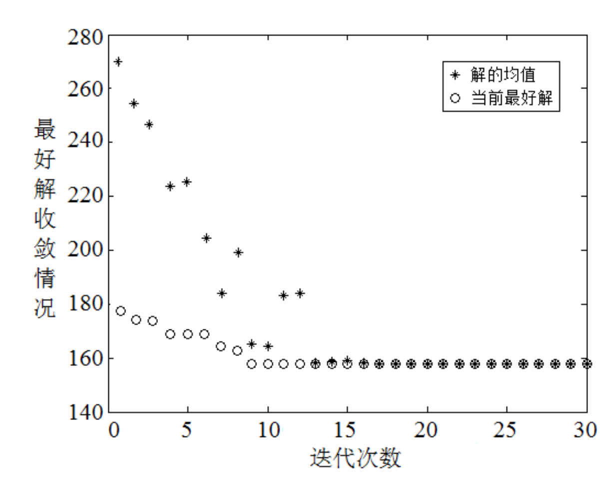


图 1　8 节点 K-PSO 算法收敛曲线

Fig. 1　Convergence curve of the 8-node K-PSO algorithm

表 1 中，“-”表示在相应算法中不存在该项信息。对于 EM，当 n=8 时，总计算时间 79 秒。这一结果与使用 K-PSO 和 GA 计算得到的结果一致。当 n=30 时，EM 无法在有限时间内求得最优解。而 K-PSO 算法在最好解的均值、偏差等方面均优于 GA。另一方面，GA 的种群规模远大于 K-PSO 的种群规模。造成这种现象的原因是协同机制的加入使得 GA 很难顾及每一转运点，从而计算的稳定性要依赖于种群规模。当 n=50 和 n=100 时，两种算法在偏差、最坏解和均值等方面的差异更加明显。因此，从表 1 可以看出，虽然 K-PSO 因计算 K 短路耗费了一定的时间，但 K-PSO 算法求解的平均质量要优于 GA。

表 1　K-PSO 与 GA 和 EM 的对比情况

Table 1　The comparison of the K-PSO with GA and EM

algorithm	V	E	T	K	PS	GEN	Best	Bad	Arg	msd	Time (s)
K-PSO	8	85	26	3	5	20	157.7	157.7	157.7	0	<1
GA	8	85	26	-	20	30	157.7	157.7	157.7	0	<1
EM	8	85	26	-	-	-	157.7	-	-	-	79
K-PSO	30	815	110	5	10	50	249.6	259.6	250.8	2.5	3
GA	30	815	110	-	70	40	249.6	261.4	254.6	5.7	1
EM	30	815	110	-	-	-	-	-	-	-	-
K-PSO	50	1 420	155	5	15	70	349.6	361.6	351.5	3.8	8
GA	50	1 420	155	-	130	60	349.6	378.5	355.4	11.2	3
EM	50	1 420	155	-	-	-	-	-	-	-	-
K-PSO	100	3 160	280	8	25	100	587.1	611.2	590.4	5.2	14
GA	100	3 160	280	-	220	100	587.1	635.6	596.9	17.9	5
EM	100	3 160	280	-	-	-	-	-	-	-	-

图 2 展示了 n=30，NO=5，r=1, 5, 10, 15, 20 时，GA 和 K-PSO 计算偏差的对比情况。

当 r=1 时，任意两点之间只有一个 3PL，于是 4PLCRCP 转换为带有约束的最短路问题。随着 3PL 数目增多，两种算法的偏差有所增加。但是当 r=10，15 和 20 时，K-PSO 的求解偏差缺有一定幅度的减少。产生这种现象的原因是随着 3PL 个数增多，K-PSO 算法的选择余地变大。而 GA 却因 3PL 数目增加导致算法求解能力变弱。

3.3　问题分析

在 4PLCRCP 中，4PL 的决策结果不仅与 3PL 供应商的运输时间和费用有关，还与节点的转换成本有着千丝万缕的

联系。表 2 展示了 n=30 时 4PL 协同模式与单 3PL 供应商运输时的对比情况。在协同模式下，当 $C_i^{'}=T_i^{'}=0$ 时，3PL 供应商的转换成本为 0，这时 4PLCRCP 转换为 4PLRP 问题[2]。随着转换费用增加，4PL 尽量使用相同 3PL 供应商。与此同时，随着转运时间增加，运输方案也会随之改变。从表 2 可以看出，在满足时间约束的条件下，相同转换费用不同转换时间下的运输费用相同。但是随着转换时间的增加，如 $C_i'=1,T_i'=20$，4PL 便无法按时完成任务，这时总的运输费用也会明显增大。由于 3PL 业务范围的限制，在 n=30 的算例中，只有 3PL 供应商 1,2,5 能够独自完成部分任务。如果使用它们单独运输，虽然不需要支付转换成本，但可能会增加总的运输费用。对表 2 中不同转换成本下完成任务的个数（图 3）以及与协同运输相比运输费用的增加幅度（图 4）上来看，协同运输模式不仅可以节省费用，还在完成任务个数（图 3）以及完成任务时的费用上（图 4）明显优于客户使用单 3PL 供应商的结果。

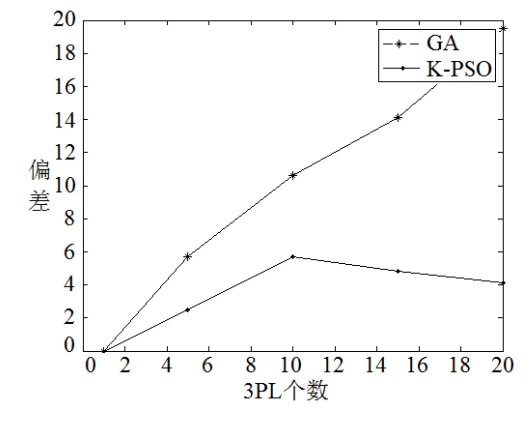


图 2　不同 3PL 数量下的偏差对比情况

Fig. 2　The deviation under the different 3PL quantities

表 2　不同运输方式下转换成本对最优解的影响

Table 2　The influence of the conversion cost on optimal solution under different transportation modes

$C_i^{'}$	$T_i^{'}$	协同运输			3PL(1)	3PL(2)	3PL(5)
		路径	3PL 供应商	时间/费用	时间/费用	时间/费用	时间/费用
0	0	[1 5 11 18 22 23 30]	[5 3 2 3 2 3]	66/227	95/227	86/234	88/296
1	0	[1 5 11 18 22 23 30]	[1 1 1 1 1 1]	95/229	95/229	84/236	88/297
1	5	[1 5 11 18 22 23 30]	[1 1 1 1 1 1]	105/229	105/229	94/236	98/297
1	10	[1 5 11 18 22 23 30]	[2 2 2 2 2 2]	104/236	115/749	104/236	108/297
1	15	[1 5 9 16 23 30]	[5 5 5 3 3]	105/270	125/1 749	114/696	118/1 127
1	20	[1 5 11 18 22 23 30]	[2 2 2 2 2 2]	124/1 696	135/2 749	124/1 696	128/2 127
2	0	[1 5 11 18 22 23 30]	[1 1 1 1 1 1]	95/231	95/231	84/238	88/299
2	5	[1 5 11 18 22 23 30]	[1 1 1 1 1 1]	105/231	105/231	94/238	98/299
2	10	[1 5 11 18 22 23 30]	[2 2 2 2 2 2]	104/238	115/751	104/238	108/299
2	15	[1 5 9 16 23 30]	[5 5 5 3 3]	105/273	125/1 751	114/698	118/1 129
2	20	[1 5 11 18 22 23 30]	[2 2 2 2 2 2]	124/1 698	135/2 751	124/1 698	128/2 129
3	0	[1 5 11 18 22 23 30]	[1 1 1 1 1 1]	95/233	95/233	84/240	88/301
3	5	[1 5 11 18 22 23 30]	[1 1 1 1 1 1]	105/233	105/233	94/240	98/301
3	10	[1 5 11 18 22 23 30]	[2 2 2 2 2 2]	104/240	115/753	104/240	108/301
3	15	[1 5 9 16 23 30]	[5 5 5 3 3]	105/276	125/1 753	114/700	118/1 131
3	20	[1 5 11 18 22 23 30]	[2 2 2 2 2 2]	124/1 700	135/2 753	124/1 700	128/2 131
4	0	[1 5 11 18 22 23 30]	[1 1 1 1 1 1]	95/235	95/235	84/242	88/303
4	5	[1 5 11 18 22 23 30]	[1 1 1 1 1 1]	105/235	105/235	94/242	98/303
4	10	[1 5 9 16 23 30]	[5 5 5 5 1 4]	104/242	115/755	104/242	108/303
4	15	[1 5 9 16 23 30]	[5 5 5 3 3]	105/279	125/1 755	114/702	118/1 133
4	20	[1 5 11 18 22 23 30]	[2 2 2 2 2 2]	124/1 702	135/2 755	124/1 702	128/2 133

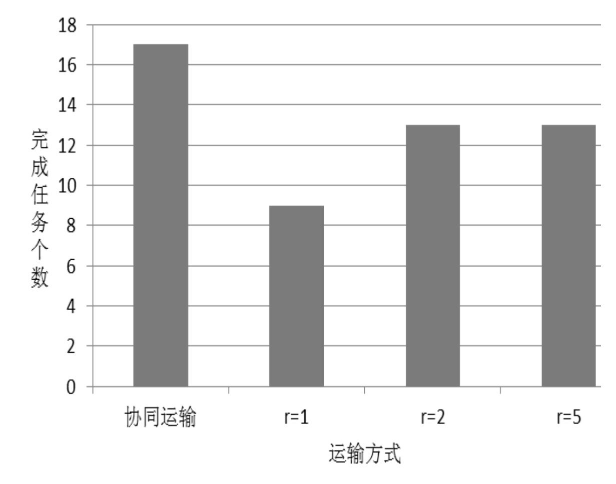


图 3　不同运输方式下 4PL 完成任务的情况

Fig. 3　The 4pls' task under the transportation modes

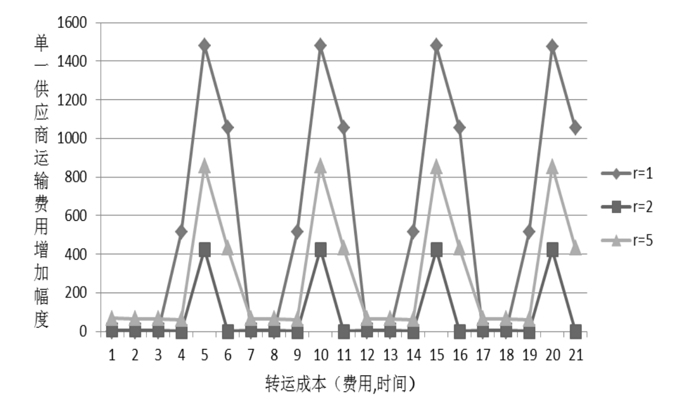


图 4　不同转运成本下 3PL 供应商 1,2,5 的费用增加幅度图

Fig. 4　The different transfer costs' chart of the 1,2,5 3PL supplier

4 结束语

第四方物流协同路径定制问题（4PLCRCP）是一类复杂的优化问题。本文在考虑转运成本基础上，建立了 4PLCRCP 的数学模型并设计了基于 K 短路的粒子群算法（K-PSO）。通过 K-PSO 与 GA 和枚举算法的比较验证了 K-PSO 的有效性。另外，实验结果表明：如果 4PL 能够有效整合多个 3PL 供应商，那么即使在中转节点收取转换费用的情况下，仍然可以起到整合优势 3PL、节省费用的目的。

参考文献：

[1] Guajardo M, Rönnqvist M. Operations research models for coalition structure in collaborative logistics [J]. European Journal of Operational Research, 2015, 240(1): 147-159.

[2] Huang Min, Cui Yan, Yang Shengxiang. Fourth party logistics routing problem model with fuzzy duration time [J]. International Journal of Production Economics, 2013, 145(1): 107-116.

[3] Tao Yi, Chew E P, Lee L H. A column generation approach for the route planning problem in fourth party logistics [J]. Journal of the Operational Research Society, 2017, 68(2): 165-181.

[4] Huang Min, Ren Liang, Lee L H. Model and algorithm for 4PLRP with uncertain delivery time [J]. Information Sciences, 2016,46(C): 211-225.

[5] Liu Qiong, Zhang Chaoyong, Zhu Keren. Novel multi-objective resource allocation and activity scheduling for fourth party logistics [J]. Computers & Operations Research, 2014, 44(2): 42-51.

[6] Dircksen M,Magnin G. Evaluation of synergy potentials in transportation networks managed by a fourth party logistics provider [J]. Transportation Research Procedia, 2017, 25(5): 824-841.

[7] Cui Yan, Huang Min, Yang Shengxiang. Fourth party logistics routing problem model with fuzzy duration time and cost discount [J]. Knowledge Based Systems, 2013, 50(3): 14-24.

[8] 王勇，吴志勇，陈修素，等. 面向第 4 方物流的多代理人作业整合优化算法 [J]. 管理科学学报，2009, 12(2): 105-116. (Wang Yong, Wu Zhiyong, Chen Xiusu，et al. Optimization algorithm for multi-agent job integration for fourth-party-oriented logistics [J]. Journal of Management Sciences in China, 2009, 12(2): 105-116.)

[9] 姚建明. 4PL 模式下网购供应链资源整合决策 [J]. 系统管理学报，2016，25(2): 308-316. (Yao Jianming. Resources integration decision for online shopping supply chain with fourth party logistics [J]. Journal of Systems & Management, 2016, 25(2): 308-316.)

[10] 任亮，黄敏，王兴伟. 考虑客户拖期厌恶行为的 4PL 路径优化问题 [J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(4): 1148-1154. (Ren Liang, Huang Min, Wang Xingwei. Fourth party logistics routing problem considering tardiness aversion behavior of customer [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(4): 1148-1154.)

[11] 林艳，全渝娟，王磊，等. 文化基因算法在第四方物流路径规划中的应用[J]. 计算机应用研究，2016，33(3): 783-787. (Lin Yan, Quan Yujuang, Wang Lei, Wu Zujiang. Application of memetic algorithm in fourth-party logistics routing problem [J]. Application Research of Computers, 2016, 33(3): 783-787.)

[12] 汪定伟. 智能优化方法 [M]. 北京:高等教育出版社,2007. (Wang Dingwei. Intelligent optimization method [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.)